第 48 卷 第 1 期　　土 壤 学 报　　Vol. 48, No. 1
2011 年 1 月　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　Jan., 2011

施肥对红壤性水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响*

陈小云[1]　郭菊花[1]　刘满强[1†]　焦加国[1]　黄欠如[2]　赖　涛[2]　李辉信[1]　胡　锋[1]

（1 南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室，南京　210095）

（2 江西红壤研究所，江西进贤　331717）

摘　要　以稻田 22 a 施肥定位实验为样地，分别采用硫酸和盐酸加热水解两种方法，研究施肥对水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响。施肥处理包括不施肥对照（CK）、单施氮肥（N）、单施磷肥（P）、单施钾肥（K）、氮磷肥混施（NP）、氮钾肥混施（NK）、氮磷钾肥混施（NPK）、双倍氮磷钾肥混施（2NPK）、氮磷钾和有机肥配施（NPK + OM）。结果表明，两种酸解法获得的有机碳组分结果趋势一致，所得结果高度相关（$p < 0.05$）。与对照相比，施肥总体上有助于土壤总有机碳的积累；除了单施钾肥处理外，其他施肥处理均提高了土壤活性有机碳的含量，但单施氮及 NPK + OM 处理显著提高了土壤有机碳活性指数（LI_C），并以 NPK + OM 的促进作用最显著（$p < 0.05$）。与对照相比，除了单施氮处理外，其他施肥处理下土壤难降解有机碳（酸解残余碳）含量均呈增加趋势，也以 NPK + OM 的作用最明显（$p < 0.05$）；单施钾肥显著提高有机碳的难降解性（$p < 0.05$），但单施氮和 NPK + OM 处理显著降低有机碳的难降解性指数（RI_C，$p < 0.05$）。施氮肥和有机肥对土壤总有机碳含量的促进作用主要体现在对活性有机碳的贡献上。因此，可以通过优化施肥措施（如选择合适有机肥种类、减施氮肥和增施钾肥等）来调控水稻土有机碳的含量及稳定性。

关键词　水稻土；土壤有机碳；活性组分；难降解性；酸解分组法

中图分类号　S153　　**文献标识码**　A

土壤有机碳对土壤质量及多种生态功能起着关键作用，是发展可持续农业的保证。近年来，温室效应的影响使得农田土壤有机碳“碳汇”功能的研究越来越被重视[1-2]。因为农田土壤有机碳的增加同时可以保障食品供应、提高生物多样性及遏制土壤退化等，是低成本的“双赢”措施[3]；并且农田土壤受到人类管理措施的强烈影响，有机碳变化快，较易调控[4]。

水稻土在我国农业生产和 CO_2 减排中具有重要地位[5-6]。我国学者一直重视水稻土的研究，在土壤有机碳、团聚结构和微生物等方面做了大量的工作[5-11]。相比旱地土壤，水稻土有机碳对我国农业土壤发挥碳汇效应可能具有更重要意义。水稻土有机碳增长快，储备潜力巨大，通过合理的管理措施可以显著增加土壤有机碳的储备[5-6]，但对其稳定性及内在机制尚缺乏了解[12]。

土壤有机碳的稳定性受到多种稳定机制的共同作用[12-13]。了解土壤有机碳库的稳定性对于指导农业管理措施增强土壤固碳能力具有重要意义[1]。为了简便，通常将土壤有机碳分成活性碳（labile C）和难降解性碳（recalcitrant C）两个库[14]。土壤活性碳具有很高的灵敏度，可在总碳变化之前反映土壤微小的变化，指示土壤碳库质量[15]；土壤难降解性碳决定着土壤有机碳的储备，在土壤有机碳稳定性研究中备受重视[16]。相当一部分研究者认为，难降解性有机碳组分能够反映土壤有机碳稳定性的高低[17-18]。不过，活性碳的增加和转化过程是难降解性碳积累的前提，与难降解性碳没有绝对界限，因此活性有机碳的研究对理解有机碳的稳定机制同样有重要意义。土壤碳库分组方法很多[12,19]，通过浓 HCl 和 H_2SO_4 加热水解的化学分组经典方法，能够简便地获得有机碳稳定性的定量信息，受到越来越多的研究者推崇[20-23]。用 6 mol L^{-1} HCl 获得的酸解残余物被认为是化学稳定的、周转

* 国家自然科学基金项目（40501036）资助

† 通讯作者，E-mail：liumq@njau.edu.cn

作者简介：陈小云（1974—），女，江苏如东人，讲师，主要从事土壤生态学研究。E-mail：xychen@njau.edu.cn

收稿日期：2009-02-05；收到修改稿日期：2009-08-28

较慢的碳库[21]；而利用 2.5 mol L^{-1} H_2SO_4 和 13 mol L^{-1} H_2SO_4 两步酸水解的方法，可以获得不同有机碳组分以评价有机碳质量或稳定性的变化[20]。

我们已经报道了不同施肥处理对水稻土物理分组有机碳的影响[24-25]，目前以化学分组方法评价水稻土有机碳稳定性的研究较少，而这部分信息对于全面了解不同施肥措施下水稻土有机碳稳定性的变化也十分重要。因此，本实验结合两种经典的酸水解方法，通过分析土壤中的活性（酸水解碳）和难降解有机碳（酸解残留碳），评价了不同施肥处理对水稻土有机碳组成和稳定性的影响，研究结果不仅能够指导施肥实践，而且将为阐述水稻土有机碳的稳定机制提供必要信息。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和实验处理

红壤性水稻土施肥长期定位实验位于江西进贤江西省红壤研究所，土壤为第四纪红黏土发育的水稻土。实验始于 1981 年，以“稻—稻—冬闲”耕作制为基础，共设 9 个处理：不施肥对照（CK），单施氮肥：90 kg hm^{-2}季$^{-1}$（N）；单施磷肥：施 P_2O_5 45 kg hm^{-2}季$^{-1}$（P）；单施钾肥：施 K_2O 75 kg hm^{-2}季$^{-1}$（K）；施氮磷肥（NP）；施氮钾肥（NK）；施氮磷钾肥（NPK）；施双倍氮磷钾肥（2NPK）；施氮磷钾肥和有机肥（早稻为紫云英，晚稻为猪粪）22 500 kg hm^{-2}季$^{-1}$（NPK + OM）。有机肥和钙镁磷肥作基肥施用，尿素和氯化钾在水稻返青后和分蘖盛期分两次追肥。小区面积 46.7 m^2，3 次重复，随机排列。小区间用水泥埂隔开，其地下填深 30 cm，地上 20 cm。实验开始前土壤基本性状、气候及农艺措施等信息参见文献[24-25]。

1.2 土样采集

于 2003 年 7 月中旬采集水稻土耕层原状土样，带回实验室自然风干，剔除较大的植物残体，风干后过 100 目筛装入密封袋中待用。

1.3 测定方法

1.3.1 H_2SO_4 水解法　在 Rovira 和 Vallejo[14, 20]的基础上修改，步骤简介如下：

（1）称 1.00 g 土样于消煮管内，加 20 ml 2.5 mol L^{-1} H_2SO_4，盖上小漏斗在 105℃下油浴 30 min，然后转移至 50 ml 离心管，在 4 500 r min^{-1}下离心 20 min，上清液倒出。离心管内土样加 20 ml 蒸馏水继续清洗离心，将两次上清液合并过 0.45 μm 滤膜。上述水解产物为活性组分 I（labile fraction I），主要包括淀粉、半纤维素、可溶性糖类等碳水化合物。

（2）离心管内的残留土样加蒸馏水离心清洗数次后，在 60℃下烘干后，再加 2 ml 的 13 mol L^{-1} H_2SO_4 转移到三角瓶，在室温下持续振荡过夜（约 10 h），然后加水将酸稀释为 1 mol L^{-1}，转移至消煮管内，在 105℃下油浴 3 h，手工间歇振荡，然后再转移至离心管离心，离心管内土样再加 20ml 蒸馏水继续清洗离心，将两次的上清液合并过 0.45 μm 滤膜。此水解产物称为活性组分 II（labile fraction II），主要包括纤维素等碳水化合物。组分 I 和 II 之和构成酸水解有机物。

（3）离心管内剩下的土样加蒸馏水离心清洗干净后，分别转移至塑料瓶内 60℃烘干，此残留物为难降解组分。酸水解残留物内的有机碳组分主要包括木质素等。

1.3.2 HCl 水解法　参照 Plante 等[22]、Rovira 和 Vallejo[26]的方法，具体步骤如下：

称 1.00 g 土样于消煮管内，加 20 ml 6 mol L^{-1} HCl，盖上小漏斗在 105℃下浸泡 16 h，手工间歇振荡。冷却后，转移至 50 ml 离心管，在 4 500 r min^{-1}下离心 20 min，水解产物丢弃，不水解的残留物用蒸馏水离心清洗干净后，转移至塑料瓶内 60℃烘干。此酸水解残留物为难降解组分。酸水解部分通过计算总有机碳和酸水解残留物的差值获得。

1.3.3 碳的测定　总有机碳、酸水解的可溶性有机碳和酸水解残留有机碳采用外加热重铬酸钾氧化方法[27]。

1.3.4 有机碳稳定性的评价指标　两种酸水解方法获得的有机碳组分均可以用来计算有机碳的活性指数（Labile index, LIc）和难降解指数（recalcitrance index, RIc）[14]：

LIc（%）=（酸水解有机碳/总有机碳）× 100

RIc（%）=（难降解有机碳/总有机碳）× 100

1.4 统计分析

不同施肥处理之间均值的多重比较采用 Duncan 检验，显著性水平（$p \leq 0.05$）。不同有机碳组分的关系采用皮尔逊相关性来表达。所有数据分析利用 SPSS 13.0 软件进行。

2　结果与分析

2.1　施肥措施对不同有机碳组分含量的影响

水稻土总有机碳含量在 17.48 ~ 22.26 g kg^{-1} 之间。与未施肥的 CK 相比,长期施用化肥后土壤有机碳含量有一致的增加趋势;特别是含钾的处理有机碳含量高于其他化肥处理;2NPK 与 NPK 相比,有机碳含量保持不变;配施有机肥的 NPK + OM 有机碳含量最高,显著高于其他处理($p < 0.05$,表 1)。

H_2SO_4 水解法获得的活性有机碳组分 I 的含量大于组分 II。与 CK 相比,除了单施钾肥活性组分 I 的含量显著降低外,其他化肥处理活性组分 I 和 II 的含量总体上均有增加,活性组分 II 的增加趋势更明显,特别是 NPK + OM 的增加程度最高,显著高于其他处理($p < 0.05$,表 1)。酸水解碳所反映的总活性有机碳(活性组分 I 和 II 之和)表现出类似但更明显的趋势。同样,各施肥处理与 CK 相比,除了单施氮肥外,难降解有机碳含量均有所增加;其中,单施钾肥(10.27 g kg^{-1})和 NK(10.13 g kg^{-1})、NPK + OM(10.38 g kg^{-1})分别增加了 12.1%、10.6%、13.3%($p < 0.05$)。HCl 水解法得到的施肥对活性碳和难降解碳的影响与 H_2SO_4 水解法趋势基本一致。两种方法获得的活性碳与难降解碳含量高度相关,相关系数分别为 0.785($p < 0.05$),0.843($p < 0.01$)。

表 1　施肥对土壤总有机碳、活性有机碳(酸水解组分)和难降解有机碳(酸水解残留碳)含量的影响(平均值 ± 标准差)

Table 1　Effects of fertilization management on contents of total organic carbon, labile carbon and recalcitrant carbon (Mean ± SD, g kg^{-1}) in soil

处理 Treatment	有机碳 Total organic carbon	H_2SO_4 水解 H_2SO_4 hydrolysis				HCl 水解 HCl hydrolysis	
		活性组分 I Labile fraction I	活性组分 II Labile fraction II	总活性组分 Total labile fraction	难降解组分 Recalcitrant fraction	活性组分 Labile fraction	难降解组分 Recalcitrant fraction
CK	17.48 ± 0.03d	6.91 ± 0.22cd	1.30 ± 0.02e	8.21 ± 0.24cd	9.16 ± 0.28d	8.43 ± 0.67de	9.05 ± 0.67b
N	18.37 ± 0.36cd	7.31 ± 0.09bc	1.59 ± 0.05bc	8.90 ± 0.10b	8.99 ± 0.46d	9.42 ± 0.12bcd	8.96 ± 0.28b
P	18.06 ± 1.27d	6.83 ± 0.17d	1.53 ± 0.13bcd	8.36 ± 0.31bcd	9.45 ± 0.42bcd	8.65 ± 0.75cde	9.41 ± 0.68b
K	18.51 ± 0.58cd	6.40 ± 0.26e	1.49 ± 0.10cd	7.89 ± 0.35d	10.27 ± 0.41ab	8.04 ± 0.85e	10.47 ± 0.87ab
NP	17.95 ± 0.56d	6.95 ± 0.25cd	1.63 ± 0.04bc	8.58 ± 0.27bc	9.32 ± 0.53cd	8.48 ± 0.81de	9.47 ± 1.37b
NK	20.07 ± 0.38b	6.93 ± 0.10cd	1.67 ± 0.02bc	8.60 ± 0.08bc	10.13 ± 0.39abc	10.62 ± 0.55ab	9.44 ± 0.84b
NPK	19.31 ± 0.31bc	7.08 ± 0.19bcd	1.68 ± 0.21b	8.77 ± 0.39b	9.58 ± 0.65abcd	9.75 ± 0.59bc	9.56 ± 0.89b
2NPK	19.47 ± 0.97bc	7.40 ± 0.34b	1.36 ± 0.04de	8.77 ± 0.38b	9.80 ± 0.72abcd	9.44 ± 0.90bcd	10.04 ± 0.40ab
NPK + OM	22.26 ± 0.50a	8.59 ± 0.25a	1.99 ± 0.08a	10.58 ± 0.30a	10.38 ± 0.19a	10.97 ± 0.16a	11.29 ± 0.49a

注:同列中不同小写英文字母表示差异达显著水平($p < 0.05$) Note: Values with the different letters in the same column mean significant difference ($p < 0.05$)

2.2　施肥措施对有机碳活性的影响

有机碳的活性指数(LIc)代表了活性有机碳在土壤总有机碳中的分布,由于两种方法获得的结果趋势相似,仅列出 H_2SO_4 水解法的结果(图 1)。施肥措施对 LIc 和总活性有机碳含量的影响表现出相似的趋势:与 CK 相比,单施氮肥和 NPK + OM 处理 LIc 分别提高了 5.32% 和 6.82%($p < 0.05$);而单施钾肥处理的 LIc 较对照降低了 8.10%($p < 0.05$)。

用活性组分 II 与总活性组分(组分 I 和 II 之和)的比例表示活性组分 II 在活性有机碳中的贡献。可以看出,与对照 CK 相比,除了 2 NPK 处理该比例显著降低外,其他施肥处理均显著增加了活性组分 II 的比例(图 2)。

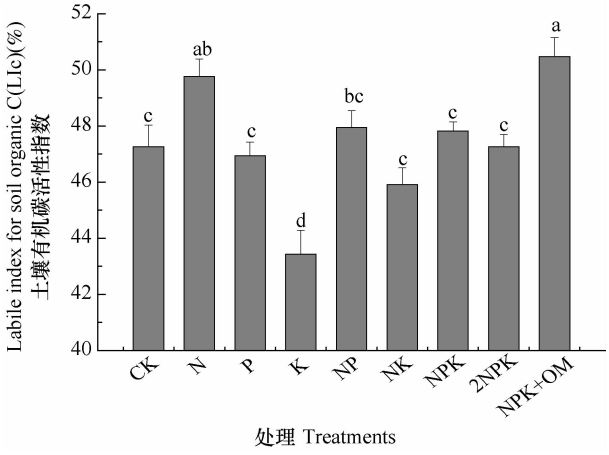

图 1　施肥措施对土壤有机碳活性指数的影响(H_2SO_4 水解法)

Fig. 1　Effects of fertilization management on labile index (LIc) of soil organic carbon (H_2SO_4 hydrolysis method)

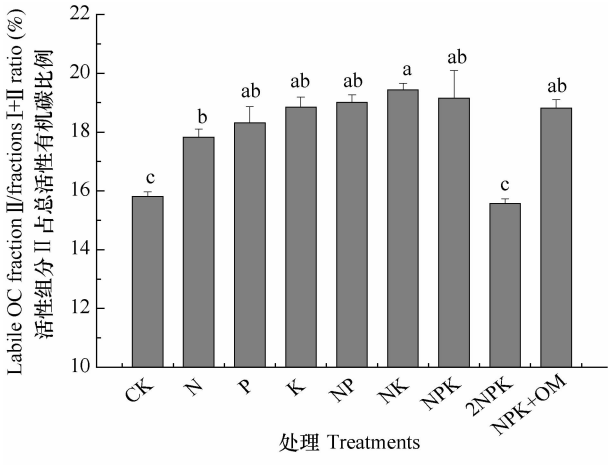

图 2 施肥措施对活性组分 II 在总活性有机碳中分布的影响(H_2SO_4 水解法)

Fig. 2 Effects of fertilization management on ratio of labile pool II vs pools Ⅰ and II (H_2SO_4 hydrolysis method)

2.3 施肥措施对有机碳难降解性的影响

用难降解指数 RIc 反映有机碳的难降解性。以 H_2SO_4 水解法为例,不同施肥措施对难降解指数 RIc 有明显的影响(图 3),与 CK 相比,RIc 在单施氮肥和 NPK + OM 的处理中分别降低了 4.77% 和 6.11%($p < 0.05$),而在单施钾肥处理中增加了 7.25%($p < 0.05$)。HCl 水解法获得的结果表现出相似的趋势(数据略)。

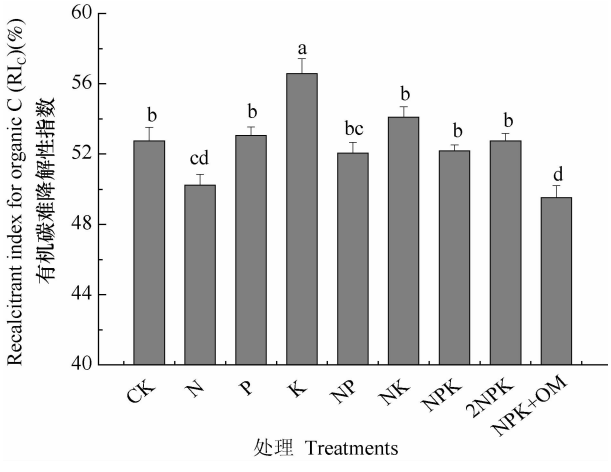

图 3 施肥措施对土壤有机碳难降解性的影响(H_2SO_4 水解法)

Fig. 3 Effects of fertilization management on recalcitrance index (RIc) of organic carbon (H_2SO_4 hydrolysis method)

3 讨 论

两种有机碳分组方法所得到的活性和难降解性碳组分趋势基本一致。虽然这两种方法在近半个世纪前就出现了,但它们在了解有机碳活性或稳定性方面的作用近来被重新认可[20-23],也有研究证明它们也非常适用于有机碳模型模拟水稻土有机碳的变化[28-29]。本研究也发现活性和难降解性有机碳对不同施肥措施的响应,相比单纯的总有机碳含量测定,我们能够在提高水稻土有机碳固定潜力方面获知更多的信息。

活性有机碳是指在一定的时空条件下,在土壤中易分解矿化的那一部分有机碳[30-31],它在指示土壤碳库的有效性和质量方面具有很高的灵敏度。Blair 等[32]认为在农业可持续发展系统中,人为管理措施对土壤有机碳导致的影响主要发生在活性有机碳部分。在本研究中,活性有机碳指能够被酸水解的有机碳组分,主要包括淀粉、半纤维素、可溶性糖类及纤维素等碳水化合物[26]。除了单施钾肥外,长期施用化肥,无论单施或配施,总体上均能提高水稻土的活性有机碳含量。化肥配施有机肥对活性有机碳的促进作用已有大量报道[33-34],除了直接施入的有机物外,对水稻生长的促进作用也间接提高了水稻光合作用产物(如根系淀积物等)向土壤的归还[35-36]。此外,施肥对活性有机碳的促进作用主要体现在对组分 II(纤维素)上,这也间接表明植物来源的有机物是水稻土有机碳增加的主要贡献者。有机碳活性指数 LIc 反映的是土壤有机碳的活性程度或生物可降解性,单独施入氮肥通常被认为对土壤存在激发效应,改善了土壤微生物的碳氮比,加强了微生物的活动[37],所以显著提高了 LIc。化肥配施有机肥对有机碳活性的显著促进与其他报道一致[15, 24, 36, 38-39],可能与猪粪中含有大量的养分及高活性有机碳有关。我们的研究结果暗示,虽然厩肥能够提高土壤总有机碳含量,但实际上还需考虑所增加有机碳部分的组成,只有充分考虑活性和难降解性有机碳的相对贡献,才能达到土壤有机碳增加对农业持续发展及缓解全球变暖的双赢目的[40]。有意思的是,单施钾肥降低活性有机碳含量和有机碳活性指数 LIc,这可能是因为丰富的 K^+ 有利于 1:1 型黏土矿物(如高岭石)向 2:1 型黏土矿物的方向转化(如蛭石和蒙脱石),矿物层间截留和吸附导致有机碳被保护[41-42]。当然,稻田特殊的淹

水种植模式也是促进水稻土活性有机碳偏高的重要原因[43]。值得注意的是,由于土壤有机碳的稳定性受到化学、物理和生物多种机制的交互影响,酸水解法获得的活性组分并不意味着在自然条件下有机碳容易损失,因此,“氮肥和有机肥配施促进有机碳活性”的结论推广时需要进一步验证。

与酸水解获得的活性有机碳组分相对应,酸解残留有机碳主要包括木质素等具有芳香环结构的和烷基结构的碳,它们一般化学稳定而难以被生物降解[14, 20]。Sollins 等[44]认为土壤有机碳保持稳定性的原因之一是土壤中某些特殊物质的化学难降解性,如其分子组成、功能团等对微生物和酶作用的抗性。土壤难降解有机碳对土壤有机碳库的长期储备具有非常重要的意义[16]。与对活性有机碳的影响趋势一致,除了单施氮肥外,施肥措施一般均促进水稻土中难降解有机碳的含量,尤以单施钾肥和 NPK + OM 处理的效果最明显,说明钾肥和有机肥在提高水稻土稳定性碳含量中的重要地位。然而,NPK + OM 对有机碳难降解性(RIc)却无积极作用,说明增施有机肥对水稻土有机碳的增加主要体现在活性有机碳的贡献上,因此有机肥在增强水稻土固碳潜力方面需要综合考虑多种有机碳稳定性机制[12, 13, 40, 44]。单施氮肥明显降低 RIc,表明今后在满足作物需求的条件下,应适当减施氮肥。单施钾肥明显增加 RIc,与前面的有机碳活性的结果相对应,说明钾肥的施用不仅有利于提高难降解性有机碳的含量,还促进了有机碳的稳定性,对于提高水稻土有机碳储备和稳定性均有重要意义。

最后,需要指出的是,活性有机碳和难降解性有机碳组分之间没有截然的界限,二者相互依存、相互转化,在土壤生态系统中均起着重要的功能。因此,在提高土壤总有机碳水平的目标下,应选择合理的农业管理措施,既保证一定水平的土壤的活性有机碳含量,又要增加有机碳的稳定性[40]。

4 结　论

两种酸水解方法获得的施肥措施对有机碳活性和稳定性组分的影响趋势相近。与不施肥的对照相比,各施肥处理均能促进土水稻土总有机碳的积累,特别是 NPK + OM 作用效果最显著;除了单施钾肥,施肥对水稻土活性有机碳含量均有一定的促进作用,以单施氮肥和 NPK + OM 处理的效果最显著,说明氮肥和有机肥对水稻土有机碳的促进主要归因于活性有机碳的积累。除了单施氮肥,其他施肥措施对水稻土中难降解性有机碳的含量有明显促进作用,以单施钾和 NPK + OM 效果最显著。单施 K 肥对有机碳难降解性的促进作用尤为明显,说明施用钾肥对提高水稻土有机碳稳定性有重要作用;而 NPK + OM 反而降低了有机碳难降解性,进一步表明有机肥对水稻土有机碳含量的促进主要在于活性有机碳的贡献。

参 考 文 献

[1] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. 土壤学报, 2007, 44 (2): 327—337. Pan G X, Zhou P, Li L Q, et al. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (2): 327—337

[2] 张国盛, 黄高宝, Yin Chan. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展. 生态学报, 2005, 25 (2): 351—357. Zhang G S, Huang G B, Yin C. Soil organic carbon sequestration potential in cropland (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (2): 351—357

[3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304: 1 623—1 627

[4] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. Global Change Biology, 2000, 6: 317—327

[5] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析. 土壤学报, 2006, 43 (1): 46—52. Li Z P, Wu D F. Organic carbon content at steady state and potential of C sequestration in subtropical China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (1): 46—52

[6] Pan G, Li L, Wu L, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. Global Change Biology, 2004, 10: 79—92

[7] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响. 生态学报, 2004, 24 (12): 2 961—2 966. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (12): 2 961—2 966

[8] Li L Q, Pan G X, Zhang X H, et al. Variation of organic carbon and nitrogen in aggregate size fractions of a paddy soil under fertilization practices from the Tai Lake Region, China. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2007, 87: 1 052—1 058

[9] 陈建国, 张杨珠, 曾希柏, 等. 不同配方施肥对长期缺施钾肥的红壤性水稻土微生物特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (6): 1 200—1 205. Chen J G, Zhang Y Z, Zeng X B, et al. Effects of different fertilizations on soil microbial characteristics in a paddy soil from red earth with long-term K-deficiency (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14 (6): 1 200—1 205

[10] 陈旸, 李忠佩, 周立祥, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土微

生物生物量及呼吸强度的影响. 土壤, 2008, 40(3): 437—442. Chen Y, Li Z P, Zhou L X, et al. Influences of fertilization on microbial biomass and respiration intensity of paddy soils in subtropical China (In Chinese). Soils, 2008, 40 (3): 437—442

[11] 刘岳燕, 姚槐应, 黄昌勇. 水分条件对水稻土微生物群落多样性及活性的影响. 土壤学报, 2006, 43 (5): 828—834. Liu Y Y, Yao H Y, Huang C Y. Influence of soil moisture regime on microbial community diversity and activity in a paddy soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (5): 828—834

[12] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. 生态学报, 2007, 27 (6): 2 642—2 650. Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (6): 2 642—2 650

[13] Lutzow M V, Kogel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions: A review. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 426—445

[14] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach. Geoderma, 2002, 107: 109—141

[15] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化. 土壤学报, 2006, 43 (5): 723—729. Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (5): 723—729

[16] Falloon P D, Smith P. Modelling refractory soil organic matter. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30: 388—398

[17] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modelling carbon turnover. Functional Plant Biology, 2003, 30: 207—222

[18] Tan Z X, Lal R, Lzaurralde R C, et al. Biochemically protected soil organic carbon at the North Appalachian experimental watershed. Soil Science, 2004, 169: 423—433

[19] Olk D C, Gregorich E G. Overview of the symposium proceedings, "Meaningful pools in determining soil carbon and nitrogen dynamics". Soil Science Society of America Journal, 2006, 70: 967—974

[20] Rovira P, Vallejo V R. Evaluating thermal and acid hydrolysis methods as indicators of soil organic matter quality. Communication Soil Science Plant Analysis, 2000, 31: 81—100

[21] Leavitt S W, Follett R F, Paul E A. Estimation of slow and fast-cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis. Radiocarbon, 1997, 38: 231—239

[22] Plante A F, Conant R T, Paul E A, et al. Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt-and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter. European Journal of Soil Science, 2006, 57: 456—478

[23] Cheng X, Chen J, Luo Y, et al. Assessing the effects of short-term *Spartina alterniflora* invasion on labile and recalcitrant C and N pools by means of soil fractionation and stable C and N isotopes. Geoderma, 2008, 145: 177—184

[24] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响. 生态学报, 2008, 28 (1): 353—360. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, et al. Effects of long-term fertilization on particulate organic carbon and mineral organic carbon of the paddy soil (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (1): 353—360

[25] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响. 土壤, 2007, 39 (5): 787—793. Guo J H, Chen X Y, Liu M Q, et al. Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil (In Chinese). Soils, 2007, 39 (5): 787—793

[26] Rovira P, Vallejo V R. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 202—215

[27] 鲁如坤. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods of soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000

[28] Shirato Y, Yokozawa M. Acid hydrolysis to partition plant material into decomposable and resistant fractions for use in the Rothamsted carbon model. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 812—816

[29] Shirato Y, Yokozawa M. Applying the rothamsted carbon model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it by simple tuning of the decomposition rate. Soil Science and Plant Nutrition, 2005, 51: 405—415

[30] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学杂志, 1999, 18 (3): 32—38. Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 1999, 18 (3): 32—38

[31] Jiang P K, Xu Q F. Abundance and dynamics of soil labile carbon pools under different types of forest vegetation. Pedosphere, 2006, 16: 505—511

[32] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. Australia Journal of Agricultural Research, 1995, 46: 1 466—1 495

[33] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. 土壤学报, 2000, 37 (2): 166—173. Shen H, Cao Z H, Xu Z H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37 (2): 166—173

[34] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (4): 459—465. Xu M G, Yu R, Sun X F, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12

(4): 459—465

[35] 潘根兴, 周萍, 张旭辉, 等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响—以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例. 生态学报, 2006, 26 (11): 3 704—3 710. Pan G X, Zhou P, Zhang X H, et al. Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (11): 3 704—3 710

[36] Liu M Q, Hu F, Chen X Y, et al. Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: The influence of quantity, type and application time of organic amendments. Applied Soil Ecology, 2009, 42 (2): 166—175

[37] Paul E A. Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry. Amsterdam: Academic Press, 2007

[38] Hao X, Liu S, Wu J, et al. Effect of long-term application of inorganic fertilizer and organic amendments on soil organic matter and microbial biomass in three subtropical paddy soils. Nutrient Cycling in Agroecosystem, 2007, 81: 17—24

[39] Yang C, Yang L, Ouyang Z. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes. Geoderma, 2005, 124: 133—142

[40] Janzen H H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 419—424

[41] Baldock J A, Skjemstad J O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. Organic Geochemistry, 2000, 31: 697—710

[42] Wattel K E J W, Buurman P, Plicht J, et al. Mean residence time of soil organic matter associated with kaolinite and smectite. European Journal of Soil Science, 2003, 54: 269—278

[43] Sahrawat K L, Sparks D L. Organic matter accumulation in submerged soils. Advances in Agronomy, 2003, 81: 169—201

[44] Sollins P, Homnn P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. Geoderma, 1996, 74: 65—105

EFFECTS OF FERTILIZATION ON LABILITY AND RECALCITRANCY OF ORGANIC CARBON OF RED PADDY SOILS

Chen Xiaoyun[1]　Guo Juhua[1]　Liu Manqiang[1†]　Jiao Jiaguo[1]　Huang Qianru[2]　Lai Tao[2]　Li Huixin[1]　Hu Feng[1]

(1 *Soil Ecology Lab, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*)

(2 *Research Institute of Red Soil of Jiangxi Province, Jinxian, Jiangxi* 331717, *China*)

Abstract　Effects of fertilization for 22 years on labile and recalcitrant fractions of organic carbon of red paddy soils were analyzed with two heated acid hydrolysis methods using H_2SO_4 and HCl, respectively. The long-term fertilization experiment was designed to have 9 treatments, i. e: (1) CK, (2) N, (3) P, (4) K, (5) NP, (6) NK, (7) NPK, (8) 2NPK, and (9) NPK + OM. Results showed that the results of fractionation of organic carbon with the two hydrolysis methods were highly correlated. Compared with CK, fertilization on the whole contributed to accumulation of total organic carbon in paddy soil. The content of labile organic carbon increased in all the treatments, except Treatment K. Labile index (LI_C) of organic carbon significantly ($p < 0.05$) increased, in Treatment N and Treatment NPK + OM, and especially in the latter. The content of recalcitrant organic carbon, residual carbon from acid hydrolysis increased somewhat in all the treatments, except Treatment N, with Treatment NPK + OM being the most significant ($p < 0.05$), while Recalcitrance index (RI_C), rose significantly in Treatment K but fell significantly in Treatments N and NPK + OM ($p < 0.05$). Obviously the contribution of N fertilizer and organic manure to total organic contents is mainly embodied in increase in labile organic carbon. Therefore, the findings imply that content and stability of organic carbon in red paddy soil can be manipulated by optimizing fertilization practices, possibly through selecting appropriate organic amendments, reducing N fertilization and enhancing K fertilization.

Key words　Paddy soil; Soil organic carbon; Labile fraction; Recalcitrance; Acid hydrolysis method